

Joona Koskela

VAAHTOLASIN KÄYTTÖ RAITIOTIEN SIIRTYMÄRAKENTEISSA

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Minna Leppänen
Maaliskuu 2020

TIIVISTELMÄ

JOONA KOSKELA: Vaahtolasin käyttö raitiotien siirtymärakenteissa

Use of foam glass in transitional structures of tramways

Tampereen yliopisto

Kandidaatintyö, 29 sivua

Maaliskuu 2020

Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Yhdyskuntatekniikka

Tarkastaja: Minna Leppänen

Avainsanat: vaahtolasi, vaahtolasimurske, routasuojaus, raitiotie, kiintoraide-laatta

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin kirjallisuuden perusteella vaahtolasimurskeen ominaisuuksia ja tarkasteltiin tapaustutkimuksena vaahtolasimurskeen käyttöä Tampereen raitiotien rakentamisessa. Vaahtolasimurske tehdään murskatusta keräys- ja kierrätyslasista kuumentamalla ja jäähdyttämällä uunista saatu vaahtolasilaatta. Vaahtolasimurskeen valmistaminen on aloitettu Euroopassa Sveitsissä vuonna 1982. Pohjoismaissa vaahtolasimursketta on valmistettu 1980-luvulta lähtien. Uusioaines Oy on Suomessa ainoa vaahtolasimursketta valmistava yritys. Tuotanto on alkanut vuonna 2011. Vaahtolasimurske on tuotteistettu ja CE-merkitty materiaali. Tuotteistaminen on vaatinut vaahtolasimurskeen laajaa testaamista ja tutkimuksia, minkä vuoksi sen ominaisuuksista on kattavasti tietoa.

Vaahtolasimurskeen lujuus- ja lämmöneristävyysominaisuudet ovat hyvät, sillä sillä on suuri leikkauskestävyyskulma, pieni kiintotiheys ja huokoinen rakenne. Hyvän lämmöneristävyysominaisuuden vuoksi vaahtolasimurske valikoitui Tampereen raitiotiellä tietyillä alueilla kiintoraidelaatan sivuille siirtymäkiilaan tasaamaan raiteiden alapuolisten rakenteiden ja katualueen välistä routanousueroa. Vaahtolasimurskeesta tehty siirtymäkiila on huomattavasti ohuempi ja pienempi kuin vastaava rakenne suodatinhiekkasta rakennettuna, mikä oli tärkeää etenkin rakennettaessa tiiviissä kaupunkiympäristössä, missä tilaa on paikoin hyvin rajoitetusti. Suulakepuristettuun XPS-routaeristelevyyn verrattaessa etuna oli vaahtolasimurskerakenteen helpompi korjattavuus ja vähäisemmät vaatimukset asennusalueen tasaisuudelle.

Vaahtolasilla pystyttiin pienentämään kerrospaksuuksia ja säästämään rahaa Tampereen raitiotien rakentamisessa. Vaahtolasimurskeen rakentamisessa koettiin jokseenkin ongelmalliseksi sen murskautuvuus, tiivistäminen, materiaalin pölyäminen ja ihoärsytys. Toisaalta vaahtolasimurske ei juurikaan lajitu varastoitaessa ja on kevyttä käsitellä.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	VAAHTOLASIN VALMISTUS	2
2.1	Raaka-aineet ja valmistusprosessi	2
2.2	Erilaiset vaahtolasituotteet	2
3.	VAAHTOLASIN OMINAISUUDET	6
3.1	Tilavuuspaino ja irtotiheys	6
3.2	Lämmönjohtokyky	7
3.3	Vedenläpäisevyys	8
3.4	Tiivistäminen	8
3.5	Raemuoto ja -koko	9
3.6	Murskautuvuus	10
3.7	Kimmomoduuli	10
3.8	Resilient-moduuli	11
4.	VAAHTOLASIN KÄYTTÖKOHTEET SUOMESSA	13
4.1	Kevennysrakenteet	13
4.2	Routaeristerakenteet	14
4.3	Kuivatusrakenne	15
4.4	Luiskatäytöt	15
5.	VAAHTOLASIN KÄYTTÖ TAMPEREEN RAITIOTIESSÄ	16
5.1	Vaahtolasi siirtymärakenteissa	16
5.2	Vaahtolasin vertailu muihin materiaaleihin	17
5.2.1	Vaahtolasimurskeen ja hiekan vertailu	18
5.2.2	Vaahtolasimurskeen ja XPS-levyn vertailu	19
5.3	Vaahtolasimurskeen varastointi Tampereen raitiotiehankkeessa	20
5.4	Vaahtolasimurskeen kustannukset Tampereen raitiotiehankkeessa	22
6.	YHTEENVETO	24
	LÄHTEET	25

1. JOHDANTO

Ympäristönäkökulmien huomioonottaminen ja kierrätysmateriaalien käyttö rakentamisessa on vuosi vuodelta enemmän esillä. Uusien vaihtoehtoisten rakennusmateriaalien ominaisuudet ja käyttäytyminen, käyttökokemukset ja niillä aikaansaadut kustannussäästöt sekä edut rakenteiden mitoittamisessa verrattuna tavanomaisiin rakennusmateriaaleihin niin infra- kuin talonrakentamisessakin on ajankohtainen tutkimusalue.

Varsinkin maarakentamisessa kierrätysmateriaalien käyttäminen on luonnonkiviaineksen säästämiseksi usein hyvinkin tarkoituksenmukaista ja niitä käytetään yhä useammin. Vaahtolasimursketta voidaan käyttää monissa eri käyttötarkoituksissa kuten kevennys- ja routaeristemateriaaleina sen hyvien lämpö- ja muodonmuutosominaisuuksien vuoksi. (Uusioaines Oy).

Tampereen raitiotiellä vaahtolasimursketta käytetään kiintoraidelaatan siirtymärakenteissa. Tässä kandidaatintyössä keskitytään tarkastelemaan vaahtolasin valintaperusteita ja käyttöä Tampereen raitiotien siirtymäkiilarakenteissa. Lisäksi vaahtolasiin ja ennen kaikkea myös Suomessa valmistettavaan vaahtolasimurskeeseen perehdytään materiaalina ja tarkastellaan sen ominaisuuksia sekä muita käyttökohteita. Vaahtolasimurske on Uusioaine Oy:n tuotteistama materiaali, joten sen ominaisuuksia on tutkittu kattavasti.

2. VAAHTOLASIN VALMISTUS

2.1 Raaka-aineet ja valmistusprosessi

Vaahtolasia valmistetaan murskatusta keräys- ja kierrätyslasista. Tällaista lasitavaraa voi olla esimerkiksi pakkauslasi, ikkunalasi, autoissa käytettävät lasit, hehkulamput, loisteputket, televisiot ja muut kuvaputket, kuten tietokoneiden näytöt. (Ritola & Vares 2008) Kuvaputkellisten televisioiden ja tietokonenäyttöjen harvinaisuuden vuoksi voidaan olettaa, että suurin osa vaahtolasin raaka-aineesta saadaan muista kuin erilaisista näyttöpäätteistä.

Ritolan ja Vareksen (2008) mukaan valmistusprosessin ensimmäinen vaihe on murskatun vaahtolasipulverin kuumentaminen yhdessä vaahtotusagentin kanssa. Näin saadaan pulverin tilavuus viisi kertaa alkutilaa suuremmaksi, ja 700–900 °C:n lämpötilassa jauhettu lasi muodostaa viskoosin nesteen. Vaahtotuksen aikaansaanut agentti muodostaa kaasua, josta taas saadaan seokseen kuplia. Vaahtolasin valmistuksessa massan kuumentaminen on tärkein tekijä, jotta syntyneet kaasukuplat jäisivät lasinesteeseen eivätkä esimerkiksi nouse sen läpi (Ritola & Vares 2008).

Vaahtolasia on valmistettu Euroopassa jo 1950-luvulta lähtien (Kuisma 2013). Ensimmäisenä Euroopassa vaahtolasimursketta on alettu valmistaa vuonna 1982 Sveitsissä (Miasapor AG 2018). Pohjoismaiden vaahtolasimurskeen käyttö on alkanut vuonna 1988 Ruotsissa ja Norjassa, mutta materiaalin tuotanto on aloitettu vuonna 1999 Norjassa (Köylijärvi 2014). Suomessa vaahtolasin tuotanto on alkanut vuonna 2011. Tällä hetkellä ainoa markkinoilla oleva tuote on Uusioaines Oy:n valmistama Foamit-tuotemerkkinen vaahtolasimurske (Uusioaines Oy 2018). Köylijärvi (2014) muistuttaa, että eri vaahtolasimursketuotemerkkien ominaisuudet vaihtelevat erilaisten valmistusvaiheen olosuhteiden sekä muun muassa lisäainevalintojen eroavaisuuksien vuoksi. Siksi eri tuotemerkkiset vaahtolasimurskeet eivät ole täysin samanlaisia ominaisuuksiltaan, eikä niitä suositella käytettäväksi sekaisin toistensa kanssa (Köylijärvi 2014).

2.2 Erilaiset vaahtolasituotteet

Ainoa Suomessa valmistettava vaahtolasituote on Forssassa toimivan Uusioaines Oy:n valmistama vaahtolasimurske, jolla on myös oma tuotenimi Foamit (Uusioaines Oy 2018). Vaahtolasimursketta valmistetaan myös muissa Euroopan maissa eri tuotemerkeillä. Vaahtolasimursketta voidaan valmistaa tuottamalla vaahtolasilevyä jatkuvatoimissa tasouunissa. Valmis vaahtolasilevy on uunista tullessaan haurasta ja murtuu herkästi sitä jäähdytettäessä pienempiin osiin, joita voidaan edelleen murskata ja tuottaa halutun

rakeisuuden omaavaa vaahtolasimursketta. (Ritola & Vares 2008) Kuvissa 1 ja 2 on esitetty Uusioaines Oy:n Foamit-tuotemerkkistä vaahtolasimursketta. Sitä valmistetaan seuraavina raekokoina:

- Foamit 60 (#0–60 mm)
- Foamit 20 (#4–20 mm) (Uusioaines Oy 2020).

Edellä mainituista Foamit-laaduista Foamit 60 on rakeisuudeltaan soveltuvin tierakentamiseen. Sitä käytetään muun muassa Tampereen raitiotien siirtymärakenteissa (Forsman et al. 2012, Passi 2017).



Kuva 1. Uusioaines Oy:n Foamit-vaahtolasimursketta (Forsman et al. 2012).



Kuva 2. Uusioaines Oy:n Foamit-vaahtolasimursketta (Forsman et al. 2012).

Muita vaahtolasituotteita ovat murskeen lisäksi levytuote, blokit, muotoeristeet ja pelletit, joista voidaan edelleen valmistaa harkkoja, paneeleja tai muotoeristeitä (Ritola & Vares 2008). Kuvassa 3 on vasemmalla vaahtolasipellettejä ja oikealla niistä valmistettua muotoeristettä.



Kuva 3. Vaahtolasipellettejä ja muotoeristettä (Ritola & Vares 2008).

Vaahtolasia voidaan käyttää myös eristävän kevytbetonin valmistuksessa siten, että kevytbetonin runkoainesta vaihdetaan vaahtolasipelliteiksi tai vaahtolasimurskeeksi (Ritola & Vares 2008).

3. VAAHTOLASIN OMINAISUUDET

3.1 Tilavuuspaino ja irtotiheys

Materiaalin tiheys ρ lasketaan sen massan ja tilavuuden suhteena seuraavalla kaavalla:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

jossa ρ on tiheys [kg/m^3], m on materiaalin massa [kg] ja V on materiaalin tilavuus [m^3].

Tilavuuspaino γ taas kertoo materiaalin painon suhteessa sen tilavuuteen ja se lasketaan kaavalla:

$$\gamma = \rho * g, \quad (2)$$

jossa γ on tilavuuspaino [kN/m^3] ja g on putoamiskiihtyvyys [m/s^2].

Vaahtolasimurskeelle voidaan määrittää kuiva- kuin märkätiheyden arvoja aivan kuin muillekin maarakennuksissa käytettäville materiaaleille kuten kalliomurskeille. Koska Uusioaines Oy:n Foamit-vaahtolasimurske on ainoa Suomessa valmistettava vaahtolasi-tuote ja käytössä suurissakin maarakennushankkeissa kuten Tampereen raitiotiellä, kes-kitytään tarkastelemaan sen ominaisuuksia. Tavanomaisten testimenetelmien käyttöä ra-joittaa vaahtolasimurskeen suuri enimmäisraekoko sekä erityisesti vaahtolasimurskeen huokoinen rakenne (Köylijärvi 2014). Taulukkoon 1 on koottu Foamit-vaahtolasimurs-keen tiheyksien arvoja sekä tilavuuspainojen arvoja.

Taulukko 1. Vaahtolasimurskeen teknisiä ominaisuuksia (Forsman et al. 2012).

Ominaisuus	Foamit-mitoitusarvot
Raekoko [mm]	10–60
Kuivairtitiheys [kg/m^3]	$210 \pm 15 \%$
Kuivairtitiheys tiivistettynä [kg/m^3] *	220...280
Märkäirtitiheys pitkäaikaisesti tierakenteessa [kg/m^3]	350
Märkäirtitiheys, pitkäaikaisesti veden alla (< 1 vuosi) [kg/m^3]	600
Märkäirtitiheys, pysyvästi veden alla [kg/m^3]	1000
Tilavuuspaino nostemitoituksessa [kN/m^3]	3,5
Tilavuuspaino, pysyvästi veden alla [kN/m^3]	10

*tiheys riippuu tavoitetiiviydestä

Taulukon arvoista voidaan päätellä, että vaahtolasimurske soveltuu erinomaisesti keven-nysrakenteisiin sen tiheyden ja tilavuuspainojen verrattain pienien arvojen vuoksi. Kuis-man (2013) mukaan soran ja kalliomurskeen tyypilliset tilavuuspainot ovat seitsenkertai-set verrattuna kuivan vaahtolasimurskeen tilavuuspainoon, joten vaahtolasimurskeesta

saa tehtyä huomattavasti kevyempiä yhtä paksuja rakenteita kuin sorasta tai kalliomurskeesta. On kuitenkin hyvä muistaa, että vaahtolasimurske on huokoisena materiaalina hyvin vettä pidättävää ja sen tilavuuspaino riippuu myös siihen sitoutuneen veden määrästä. Vaahtolasimurskeen tilavuuspaino on kuitenkin myös vedellä kyllästettynä alle puolet soran tai kalliomurskeen tilavuuspainosta, joten suurta vaikutusta vedellä ei ole vaahtolasimursketta käytettäviin kevennysrakenteisiin. (Kuisma 2013)

3.2 Lämmönjohtokyky

Vaahtolasimurske toimii routaeristemateriaalina muun muassa tie- ja katurakenteissa sen hyvän lämmöneristävyyden vuoksi. Vaahtolasimurske on routimaton materiaali ja sen avulla voidaan jopa puolittaa päällysrakenteen kokonaispaksuus verrattuna tavanomaiseen lämpöeristämättömään rakenteeseen. (Forsman et al. 2012) Taulukossa 2 on esitetty Uusioaines Oy:n valmistaman Foamit-vaahtolasimurskeen lämmönjohtavuuksien arvot. Lisäksi taulukkoon 3 on koottu vaahtolasimurskeesta valmistetun rakenteen paksuuksien vastaavuudet tavanomaisiin rakennekerrosmateriaaleihin verrattuna.

Taulukko 2. Foamit-vaahtolasimurskeen lämmönjohtavuus (Forsman et al. 2012).

	Lämmönjohtavuus [W/mK]
Kuiva	0,11
Kostea	0,15

Taulukko 3. Foamit-vaahtolasimurskeesta valmistettujen rakenteiden lämmöneristävyyden vastaavuus tavanomaisista materiaaleista valmistettujen rakenteiden lämmöneristävyyteen (Forsman et al. 2012).

Materiaali	Vaahtolasi-murske	Hiekka	Murske / sora	Louhe
Kerrospaksuus [m]	0,2	0,8	0,9	1,0
	0,25	1,0	1,1	1,25
	0,3	1,2	1,3	1,5

Taulukoista 2 ja 3 nähdään, että saman lämmöneristävyyden omaava, vaahtolasimurskeesta rakennettu rakenne voi olla jopa viisi kertaa ohuempi kuin hiekasta, kalliomurskeesta, sorasta tai louheesta rakennettu rakenne, mikä voi johtaa koko päällysrakenteen paksuuden puolittumiseen (Forsman et al. 2012). Lisäksi vaahtolasimurskeen lämmönjohtavuus hiekkaan verrattuna on Forsman et al. (2012) mukaan neljä kertaa pienempi, mistä voidaan karkeasti päätellä muidenkin luonnonmateriaalien olevan lämmöneristävyydeltään huomattavasti vaahtolasia heikompia.

3.3 Vedenläpäisevyys

Vaahtolasimurskeen vedenläpäisevyyden on arvioitu olevan samaa suuruusluokkaa kuin saman raekoon ja raemuodoltaan samanlaisen kalliomurskeen tai soran (Forsman et al. 2012). Vaahtolasi toimiikin hyvänä kapillaarikatkona rakenteessa, eikä vesi näin pääse imeytymään sen yläpuolelle rakennettaviin kerroksiin pohjamaasta. Vaahtolasimurskeen vedenläpäisevyyden k arvoksi on arvioitu $\geq 0,1$ m/s (Eriksson & Hägglund 2008, Köylijärvi 2014 mukaan).

Vaahtolasimurskeen huokosmaisen rakenteen takia sen vedenimeytyminen on kuitenkin suhteellisen suurta kuten taulukossa 4 on esitetty. Vedenimeytyminen on vedenläpäisevyyden lisäksi vaahtolasille tärkeä ominaisuus, koska sillä on suuri vaikutus vaahtolasimurskeen tilavuuspainoon etenkin pitkäaikaisesti (Köylijärvi 2014).

Taulukko 4. *Foamit-vaahtolasimurskeen vedenimeytyminen (Forsman et al. 2012).*

Vedenimeytyminen	Foamit-mitoitusarvot
Lyhytaikainen (4 viikkoa)	≈ 60 paino-%
Pitkäaikainen (1 vuosi)	≈ 100 paino-%

Kuten taulukosta 4 nähdään, pitkäaikaisessa upotuksessa Foamit-vaahtolasimurskeeseen imeytyy jopa vaahtolasin kuivatilavuuspainon verran vettä. Tällöin myös vaahtolasin tilavuuspaino kasvaa huomattavasti, millä voi olla vaikutusta vaahtolasimursketta sisältävään rakenteeseen etenkin pitkäaikaisesti.

3.4 Tiivistäminen

Materiaalin tiivistettävyyys vaikuttaa suoraan sen toimivuuteen rakenteessa (Köylijärvi 2014). Jos rakennetta ei pystytä tiivistämään kunnolla, materiaali ei myöskään pysty saavuttamaan esimerkiksi sille ominaisia muodonmuutosominaisuuksia.

Tiivistystyön laatua kuvataan tiiviysasteella, joka kertoo rakennekerroksen kuivatilavuuspainon suhteen Proctor-kokeella tietyllä työmäärällä laboratoriossa saavutettuun maksimikuivatilavuuspainoon. Vaahtolasimurskeen tyyppillinen raekoko on karkearakeisempi kuin mitä tavanomaisessa Proctor-kokeessa käytetään, eikä tavanomaiselle maa- ja kiviainekselle ylisuurten rakeiden osalta käytettävä kivikorjaus suoraan sovellu rakeiden huokoisuuden ja pienen kiintotiheyden takia. Testissä käytettävän Proctor-sellin halkaisijasta riippuu tutkittavan testinäytteen maksimiraekoko. Valmistajan mukaan vaahtolasimurskeen kuivairtitiheys tiivistetyssä kerroksessa on tyyppillisesti $220\text{--}280$ kg/m³ (Forsman et al. 2012).

Tiivistymiskerroin on tiivistämättömän vaahtolasimurskekerroksen vaahtolasin tilavuuden suhde tiivistetyn kerroksen tilavuuteen (Forsman et al. 2012). Vaahtolasimurskeen

3.6 Murskautuvuus

Vaahtolasin murskautuvuus määritetään kevytkiviaineekselle tarkoitetun standardin EN 13055-1 mukaisesti. Kokeessa käytetään vaahtolasimurskeella täytettyä terässylinteriä. Sylinterissä olevaa vaahtolasimursketta kuormitetaan männän avulla tietylle etäisyydelle. Työntömatkan vaatima työntövoima otetaan ylös. Murskautumiskestävyydellä tarkoitetaan tarvittavaa työntövoimaa jaettuna käytetyn männän pinta-alalla. Taulukossa 5 on esitetty Foamit-vaahtolasimurskeen murskautuvuus eri kokoonpuristuman arvoilla.

Taulukko 5. Foamit-vaahtolasimurskeen murskautuvuus (Forsman et al. 2012)

Kokoonpuristuma [%]	Murskautuvuus [MPa]
10	0,3...0,4
20	> 0,9

Murskautuvuus tarkoittaaakin partikkelien murskauskestävyyttä eli puristuslujuutta (Köylijärvi 2014), kuten se Foamitin omassa suunnitteluohjeessa (Forsman et al. 2012) on ilmaistu.

3.7 Kimmomoduuli

Kimmo- eli E-moduuli on yksi muodonmuutosmoduuleista, jotka vaikuttavat materiaalin muodonmuutosominaisuuksiin. Sitä on tärkeä tarkastella, sillä mitoittaessa tierakennetta Odemarkin menetelmällä eli kantavuusmitoitustarkastelulla tarvitaan laskennassa rakennekerroksen E-moduuli. Vaahtolasimurskeella kimmomoduulin arvo riippuu sekä jännitys- että kuormitustasosta. Jännityskuormitukseen taas vaikuttavat olennaisesti rakenteeseen aiheutuva liikennekuorma ja muut kuormitusta aiheuttavat tekijät, kuten läheiset rakennukset tai penkereet. (Köylijärvi 2014)

Kimmomoduulia voidaan arvioida levykuormituskokeella, josta saadaan tietyn kuormituksen aiheuttamasta painumasta laskettua likiarvoinen E-moduuli. Kimmomoduuli on suure, jonka tiedetään noudattelevan tavanomaisen tierakenteen jännitys-muodonmuutos-tilaa. (Ehrola 1996) Lopullinen E-moduulin arvo lasketaan takaisinlaskennalla levykuormituskokeista. Vaahtolasimurskeen takaisinlaskentatulokset on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Foamit-vaahtolasimurskeen E-moduuli (Forsman et al. 2012)

Määrittäminen	Moduuli
Levykuormituskokeista takaisinlaskettu	55...70 MPa*, ohut...paksu päällysrakenne

*vaahtolasimurskeen moduulia rakenteessa kasvattavia tekijöitä ovat paksu päällysrakenne, pohjamaan hyvä kantavuus sekä tukipenkereet

Levykuormituskoe antaa rakenteen kokonaisjäykkyyttä kuvaavan mittaustuloksen, joka vastaa Odemarkin menetelmällä laskettua. Levykuormituskokeella määritetään kimmo-
moduulille kaksi arvoa E_1 ja E_2 . Ensimmäinen arvo tulee kokeen ensimmäisestä kuormi-
tussyklistä ja toinen toisesta kuormitussyklistä. Toisen kuormitussyklin alkaessa raken-
teeseen on jäänyt jo ensimmäisen kuormitussyklin aiheuttamia palautumattomia muodon-
muutoksia. E_2 -arvo on usein se arvo, jota käytetään mitoittavana. Tiivistystyön arvioin-
nissa käytetään moduulien suhdetta E_2/E_1 eli tiivistyssuhdetta, jonka vaatimuksena on
usein $< 2,2$. (Ehrola 1996)

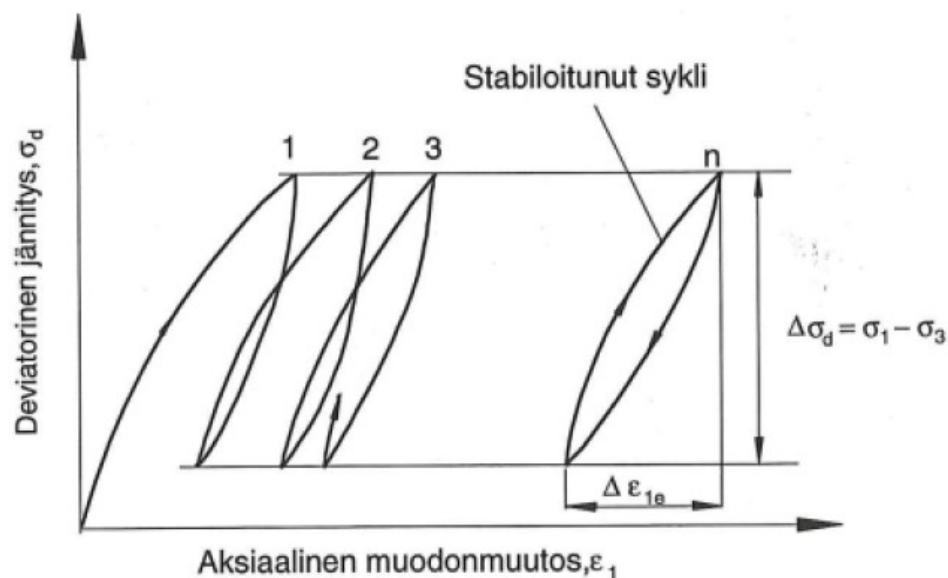
3.8 Resilient-moduuli

Resilient-moduuli, M_r , joka on maan palautuvia muodonmuutoksia kuvaava jäykkyys-
moduuli, voidaan määrittää syklisellä kolmiaksisiaalikokeella (Köylijärvi 2014). Vaahto-
lasimurskeen jäännösmoduulin tulokset kahdella pääjännityksen arvolla on esitetty tau-
lukossa 7.

Taulukko 7. *Foamit-vahtolasimurskeen Resilient-moduuli (Forsman et al. 2012).*

Määrittäminen	Moduuli
Syklisen kolmiaksisiaalikoe (keskim. pääjännitys 40 kPa)	≥ 75 MPa
Syklisen kolmiaksisiaalikoe (keskim. pääjännitys 100 kPa)	≥ 150 MPa

Resilient-moduuli kuvaa sellaista vakiintunutta kimmoista kuormituskäyttäytymistä, joka
voidaan havaita syklisen kolmiaksisiaalikokeen toistuvien kuormituskertojen jälkeen. Täl-
laista stabiloitunutta sykliä voidaan havainnollistaa kuvalla 5. (Ehrola 1996)



Kuva 5. *Syklisen kuormituksen alaisena olevan sitomattoman materiaalin kuormitus-
muodonmuutuskäyttäytyminen (Ehrola 1996)*

Resilient-moduuli, M_r , voidaan laskea kaavalla:

$$M_r = \frac{\Delta\sigma_d}{\Delta\varepsilon_e}, \quad (3)$$

jossa M_r on jäännös- eli resilient-moduuli, $\Delta\sigma_d$ on deviatorisen jännityksen vaihteluväli ja $\Delta\varepsilon_e$ on palautuva suhteellinen muodonmuutos. Resilient-moduuli on siis deviatorisen jännityksen eli esimerkiksi ajoneuvon renkaiden aiheuttaman kuormituspulssin syklisesti muuttuvan jännityksen vaihteluvälin ja palautuvan suhteellisen muodonmuutoksen suhde. (Ehrola 1996)

4. VAAHTOLASIN KÄYTTÖKOHTEET SUOMESSA

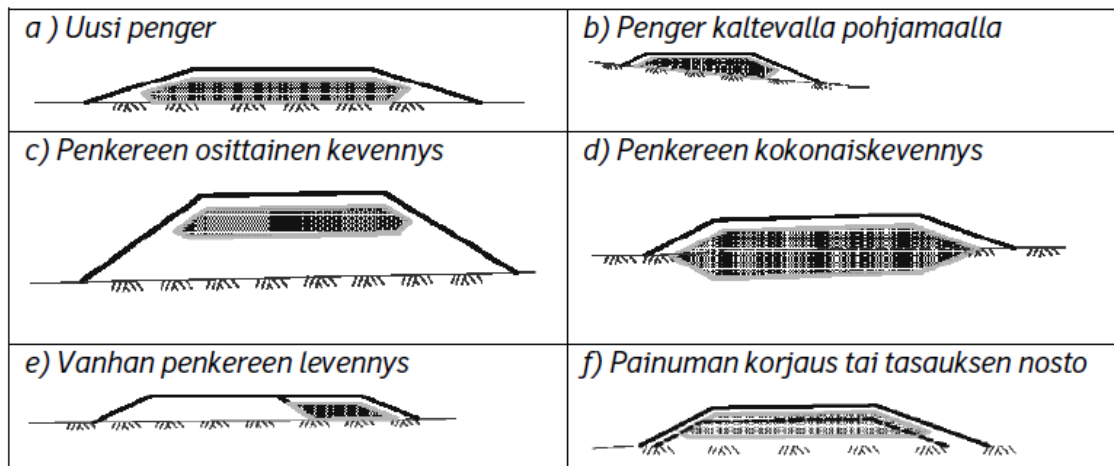
4.1 Kevennysrakenteet

Rakennettaessa pehmeikköalueille olosuhteet ovat usein haasteellisia. Haasteita tulee esimerkiksi painumien hallinnassa ja penkereen tai rakennettavan alueen kuten kentän vakavuudessa. Tällöin saattaa olla järkevää ryhtyä pohjanvahvistustoimenpiteisiin, joilla rakennekerroksista aiheutuvia kuormia voidaan vastaanottaa lujittamalla pohjamaata tai välittämällä ne kovaan maaperään tai kallioon. Toinen vaihtoehto on hyödyntää kevennysmateriaalin kuten esimerkiksi vaahtolasin pientä tilavuuspainoa korvaamalla osa kiviaineksesta vaahtolasimurskeella. Tällöin rakenteesta tulee kevyempi ja pohjamaahan kohdistuvat kuormat ovat pienempiä. Kevennysrakenteesta saatu vaikutus vastaa tasauksen alentamista, jolloin myös alueellinen vakavuus saadaan paremmaksi ja painumista tulee pienempiä. (Liikennevirasto 2011)

Tavallisimpia käyttökohteita kevennysrakenteille ovat:

- tie- ja siltojen tulopenkereet
- siirtymärakenteet
- meluvallit
- putkilinjat
- korjaus- ja täydennysrakentaminen
- rakenteiden tausta- ja alustäytöt (Liikennevirasto 2011, Forsman et al. 2012).

Edellä mainittujen kevennysrakenteiden geoteknisessä suunnittelussa tarkastellaan pohjamaan vakavuus eli stabiliteetti, joka selvitetään vakavuustarkastelun perusteella, sekä pehmeikköalueille tyypilliset painumat. Painumista merkityksellisimmät suunnittelun kannalta ovat konsolidaatio- ja jälkipainuma. Vaahtolasimurskeesta tehtävän kevennyksen paksuus ja laajuus mitoitetaan siten, että pohjamaan vakavuuden perusteella määritetty varmuus sortumista vastaan on riittävä. Painumat taas otetaan suunnittelussa huomioon siten, että vaahtolasimurskeinen kevennysrakenne ei aiheuta pohjamaalle lisäpainumia tai kevennykselle määritetään tavoitepainuma. Ensiksi mainitussa tapauksessa puhutaan kokonaiskevennyksestä, kun taas jälkimmäistä kutsutaan osittaiseksi kevennykseksi. (Liikennevirasto 2011, Köylijärvi 2014) Kuvassa 6 on periaatekuvia erilaisista kevennys-tapauksista.



Kuva 6. Tiepenkereen erilaisia kevennyssovelluksia (Liikennevirasto 2011)

4.2 Routaeristerakenteet

Roudan tunkeutumista syvälle pohjamaahan voidaan estää routaeristeiden kuten vaahtolasin avulla. Routaeristeellä estetään, että routarajan alapuolella maassa liikkuva vesi ei pääse jäätymään ja aiheuttamaan routaturpoamaa pohjamaahan ja edelleen vaurioita aiheuttavaa routanousua yläpuolisiin rakennekerroksiin. Routanousu aiheuttaa päällysteseen pitkittäisiä halkeamia tai pituussuuntaista epätasaisuutta. (Aho & Saarenketo 2006, Köylijärvi 2014 mukaan)

Kuten taulukossa 3 on todettu, vaahtolasimurske on lämmöneristävyydeltään huomattavasti tavanomaisia maarakennusmateriaaleja parempi materiaali, minkä vuoksi se toimii hyvänä routaeristeenä katu- ja tierakenteissa, kentillä ja pihoilla. Esimerkiksi hiekkaan verrattuna vaahtolasimurskeen lämmöneristävyys on nelinkertainen, eli hiekasta rakennettu routaeristekerroksen paksuus tulee olla neljä kertaa vaahtolasimurskeesta rakennettua paksumpi. Vaahtolasilla on routaeristeenä myös keventävä vaikutus maa-ainekseen verrattuna. (Forsman et al. 2012)

Koska vaahtolasimurske eristää tehokkaasti lämpöä, on suunnitteluvaiheessa otettava huomioon pohjamaasta johtuva lämpö, joka vapautuu vaahtolasimurskerakenteessa hitaammin rakenteen pintaan. Tämä ilmiö on haitallinen etenkin loppusyksyisin, kun ensimmäiset pakkaset tulevat. Tällöin routaeristetty rakenne jäätyy herkemmin kuin eristämätön rakenne, mikä ilmenee haitallisen mustana jäänä etenkin katujen ja teiden pinnoilla. Jotta epätasainen päällysteen pinnan jäätyminen voidaan estää, on tärkeää, että päällystettä ei tehdä suoraan routaeristeen päälle, vaan routaeristeen päälle mitoitetään tarpeeksi paksut rakennekerrokset (Liikennevirasto 2011).

4.3 Kuivatusrakenne

Jos vaahtolasimurskeen puristuslujuus on riittävä suhteessa suunnittelukohteen vaatimuksiin, sitä voidaan käyttää kuivatuskerroksessa sekä talonrakentamisessa että taitorakenteissa. Vaahtolasimurskeen arvioitu vedenläpäisevyys $\geq 0,1$ m/s tarkoittaa, että se on hyvin vettäläpäisevää ja soveltuu kuivatuskerrokseen. (Eriksson & Hägglund 2008, Köylijärvi 2014 mukaan) Mikäli routanousut halutaan minimoida, vaahtolasimurskeesta rakennetun routaeristeen alle voidaan joko rakentaa erillinen kuivatuskerros tai tehdä vaahtolasimurskekerroksesta ylipaksu, jolloin erillistä kuivatuskerrosta ei tarvita (Forsman et al. 2012).

Mitä suurempia rakeiden väliset huokokset ja niiden muodostamat käytävät ovat, sitä huommin vesi nousee kapillaarisesti ylöspäin (Rantamäki et al. 2009, Köylijärvi 2014 mukaan). Vaahtolasimurskerakeiden väliset huokokset eli tyhjätilat ovat niin suuria, että se toimii hyvänä kapillaarikatkona suodatinkerroksessa (Forsman et al. 2012, Köylijärvi 2014). Toisaalta vaahtolasi murskautuu ja on huokoinen materiaali, minkä vuoksi rakeissa olevien huokosten imuvoima ja murskautumisessa muodostuva pöly voivat aiheuttaa kapillaarista nousua.

4.4 Luiskatäytöt

Vaahtolasimurskeesta voidaan sen verrattain hyvän kitka- eli leikkauskestävyyskulman takia tehdä jyrkkiäkin luiskatäyttöjä. Suuren leikkauskestävyyskulman ansiosta luiskan ja koko rakenteen vakavuus paranee. Pieni tilavuuspaino pienentää lisäksi pohjamaahan kohdistuvaa kuormitusta. (Hagen & Vaslestad 2013, Köylijärvi 2014 mukaan)

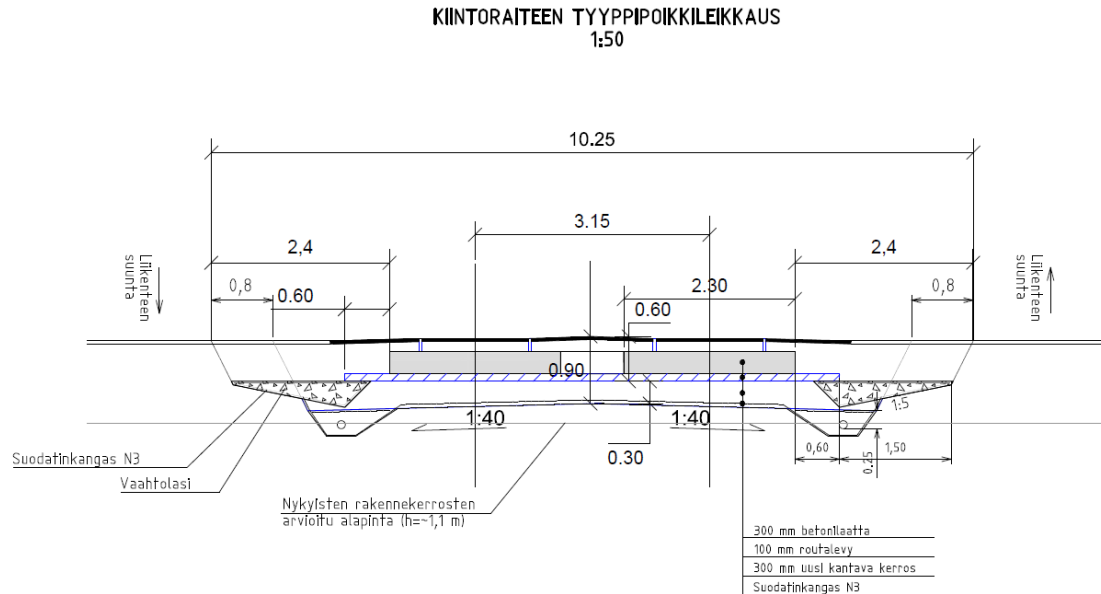
5. VAAHTOLASIN KÄYTTÖ TAMPEREEN RAITIOTIESSÄ

5.1 Vaahtolasi siirtymärakenteissa

Vaahtolasimurskeen käytön on katsottu olevan tarkoituksenmukaista Tampereen raitiotien siirtymärakenteissa. Tähän käyttöön on valittu Uusioaines Oy:n Foamit-vaahtolasimurske. Uusioaines Oy on tällä hetkellä ainoa Suomessa vaahtolasituotteita valmistava yritys, ja siksi sen valmistama tuote on valikoitunut myös raitiotien käyttöön.

Tampereen raitiotien rakenteissa vaahtolasimurske toimii kiilamaisena rakenteena sekä routaeristeenä että routaerojen tasaajana kiintoraidelaatan reuna-alueilla. Routanousuerojen tasausta vaaditaan katualueen, kuten jalkakäytävän ja pyörätien tai ajoradan ja kiintoraidelaatan välillä. Tampereella kiintoraidelaattoja rakennetaan omille raitiotiekaistoilleen ja nurmirataosuuksille. Erityisesti keskusta-alueella Hämeenkadulla ja Hervannassa Insinöörinkadulla on sekaliikenneväyliä, jotka on tarkoitettu raitiovaunujen lisäksi linja-autoille, takseille ja paikoin yksityisautoille. Lisäksi kiintoraidelaattoja on liittymäalueilla, joiden ylittäminen esimerkiksi sepeliraitteella tai nurmiradalla olisi mahdotonta.

Vaahtolasimurskeesta valmistettua kiilamaista siirtymärakennetta tarvitaan laattojen reunoilla siksi, että routaolosuhteet ovat erilaiset kiintoraidelaatta-alueella ja sen vieressä olevalla katuosuudella. Routaolosuhteiden erot johtuvat katualueen ja kiintoraidelaatan alapuolisten rakenteiden erilaisista kerrosvaatimuksista. (Passi 2017) Vaahtolasikiilalla pyritään siis tasaamaan kiintoraidelaatan ja sen vieressä kulkevan katualueen mahdollisia routanousueroja. Kuvassa 7 on tyyppipoikkileikkaus Tampereen raitiotiellä käytettävästä kiintoraidelaatasta.



Kuva 7. Tampereen raitiotien kiintoraidelaatan tyyppipoikkileikkaus. Siirtymäkiila vaahtolasimurskeesta. (Raitiotieallianssi 2017)

Tyyppipoikkileikkauspiirroksesta nähdään vaahtolasimurskekiilan periaaterakenne kiintoraidelaatan ja katualueen liitoskohdassa. Vaahtolasimurskeen ympärille tulee poikkileikkauskuvan mukaisesti kauttaaltaan suodatinkangas.

5.2 Vaahtolasin vertailu muihin materiaaleihin

Vaahtolasimurskeesta voidaan sen eristävyysominaisuuksien ansiosta rakentaa jopa viisi kertaa ohuempia kerroksia kuin vastaavista tavanomaisista rakennusmateriaaleista saman routasuojaustason saavuttamiseksi (Forsman et al. 2012). Taulukossa 8 on kuvattu vaahtolasimurskeen hyötyjä ja haittoja verrattuna muihin vaihtoehtoisiin materiaaleihin, joita Tampereen raitiotiessä oli suunnitteluvaiheessa tarkasteltu. Vaihtoehtoisina materiaaleina on tarkasteltu suodatinhiekkää ja XPS-levyä eli suulakepuristettua polystyreenieristevyä.

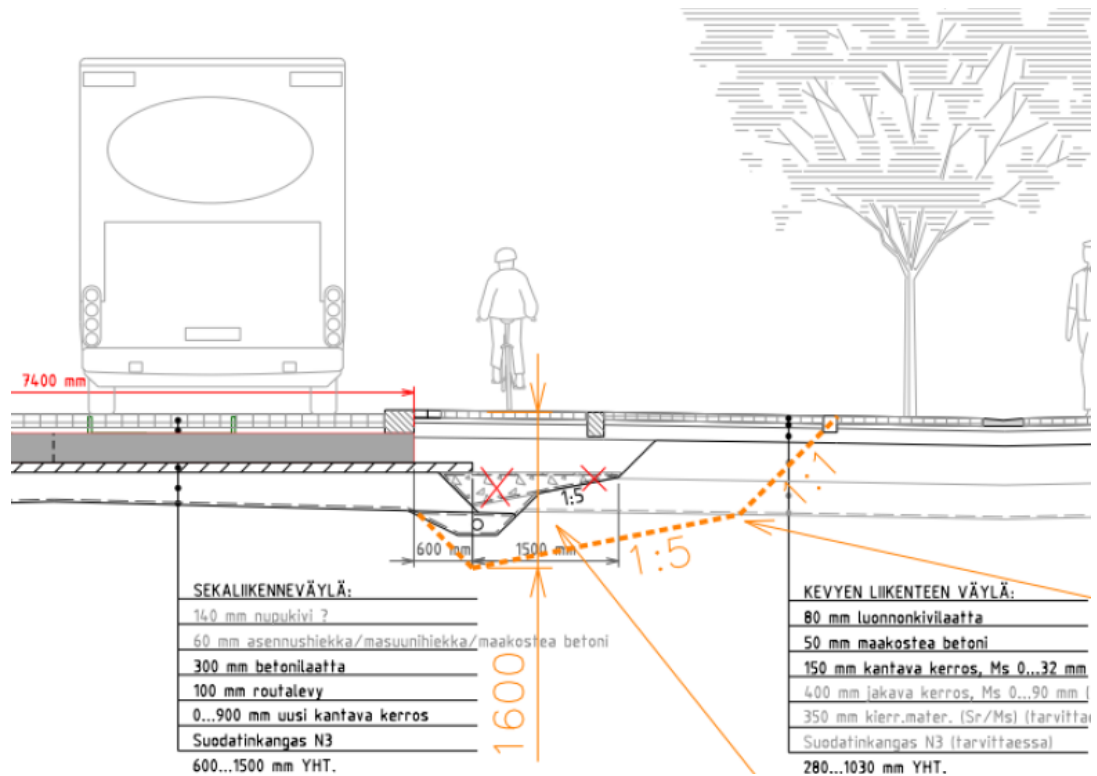
Taulukko 8. *Vaahtolasimurskeen vertailu, Tampereen raitiotie. + kuvaa hankkeen kannalta positiivista/hyvää ominaisuutta ja – negatiivista/huonoa ominaisuutta muihin tarkasteltuihin materiaaleihin verrattuna: ++ hyvä, + kohtuullinen, - huono.*

	Vaahtolasimurske	Suodatinhiekkä	XPS-levy
Rakennepaksuus	+	-	++
Hankintahinta + kuljetukset	+	-	++
Saatavuus	++	+	++
Materiaalivirtojen hallinta	++	-	+
Vaikutukset korjaukseen	+	+	-
Rakennettavuus / asentaminen	-	++	+
Ominaisuuksien pysyvyys / käyttöikä	+	++	+

Taulukossa 8 on vertailtu vaahtolasimurskeen, suodatinhiekan ja suulakepuristetun XPS-levyn soveltuvuutta Tampereen raitiotien siirtymäkiilamateriaaliksi eli ahtaassa kaupunkiympäristössä rakennettavaan rakenteeseen. Esimerkiksi suodatinhiekan käyttö pienemmissä kohteissa, kuten tierakenteen siirtymäkiilana, on huomattavasti edullisempaa kuin vaahtolasimurskeen käyttö. Rakennettavuudessa on huomioitu, että vaahtolasimurske pölyää ja ärsyttää ihoa, mikä aiheuttaa asentajille haittaa. Lisäksi vaahtolasikiila ympäröidään suodatinkankaalla, mikä hankaloittaa työskentelyä ja on ylimääräinen työvaihe. XPS-levyn soveltuvuutta rakennettavuuden kannalta puoltaa sen asennettavuus, mutta toisaalta se edellyttää tasaisen asennusalustan, kun taas rakeiset materiaalit voidaan asentaa epätasaiselle alustalle.

5.2.1 Vaahtolasimurskeen ja hiekan vertailu

Tampereen raitiotiehankkeessa on määritetty, että vaahtolasikiilaa vastaavaa maakiila on suodatinhiekkalla toteutettuna kooltaan moninkertainen vaahtolasikiilaan verrattuna. Kuva 8 on havainnollistaa vertailurakenteiden välistä kokoeroa.



Kuva 8. Kiintoraidelaatan ja katualueen välisen vaahtolasikiilan ja vastaavan suodatinhiekkakiilan kokoero. Kuvaan on merkitty keltaisella katkoviivalla hiekasta rakennettavan kiilan tarvitseman lisäkaivun alapinta ja luiskakaltevuudet (Passi 2017)

Kuvasta 8 saa selvän käsityksen, kuinka paljon pienempi kaivutyö ja materiaalienekki on, kun käytetään vaahtolasimursketta hiekan sijaan. Pienempi materiaalmäärä tarkoittaa vähäisempää työmaaliikennettä sekä mahdollisesti pienempiä kustannuksia.

5.2.2 Vaahtolasimurskeen ja XPS-levyn vertailu

Tampereen raitiotien suunnittelussa pohdittiin vaahtolasimurskeen vaihtoehtona myös XPS-levystä tehtävää kiilaratkaisua. XPS-levyllä routakiila olisi toteutettu portaittain kiilan ulkoreunaa kohden ohentuvana siten, että lähempänä kiintoraidelaattaa olisi paksumpi levy tai useampi levy päällekkäin ja levyn paksuus olisi ohentunut portaittain siirryttäessä laatan ulkopuolelle. (Kärki 2019)

Vaahtolasimurskekiilaan kuitenkin päädyttiin saneeraamisen helpottamisen vuoksi. Kaiettaessa XPS-eriste rikkoutuu ja se on verrattain vaikeampi korjata alkuperäistä vastaavaan kuntoon kuin vaahtolasimurskeesta valmistettu kiila.

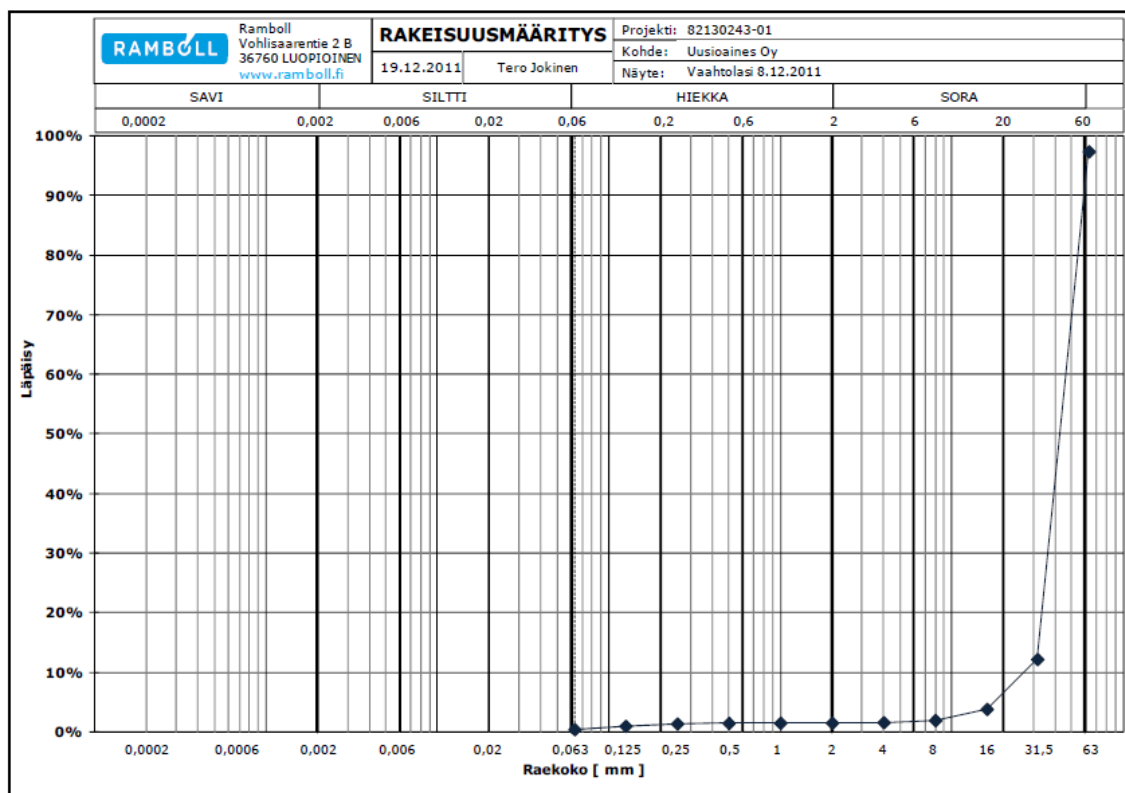
5.3 Vaahtolasimurskeen varastointi Tampereen raitiotiehankkeessa

Foamit-vaahtolasimurskeen varastointi ei merkittävästi eroa tavanomaisten maarakennusmateriaalien, kuten kalliomurskeen varastoinnista. Kuvassa 9 on esimerkki vaahtolasimurskeen varastoinnista Raitiotieallianssin varastointialueelta Tampereelta.



Kuva 9. Foamit 60 -vaahtolasimurskeen varastointia Raitiotieallianssin varastointialueella Tampereella (Joona Koskela 2018)

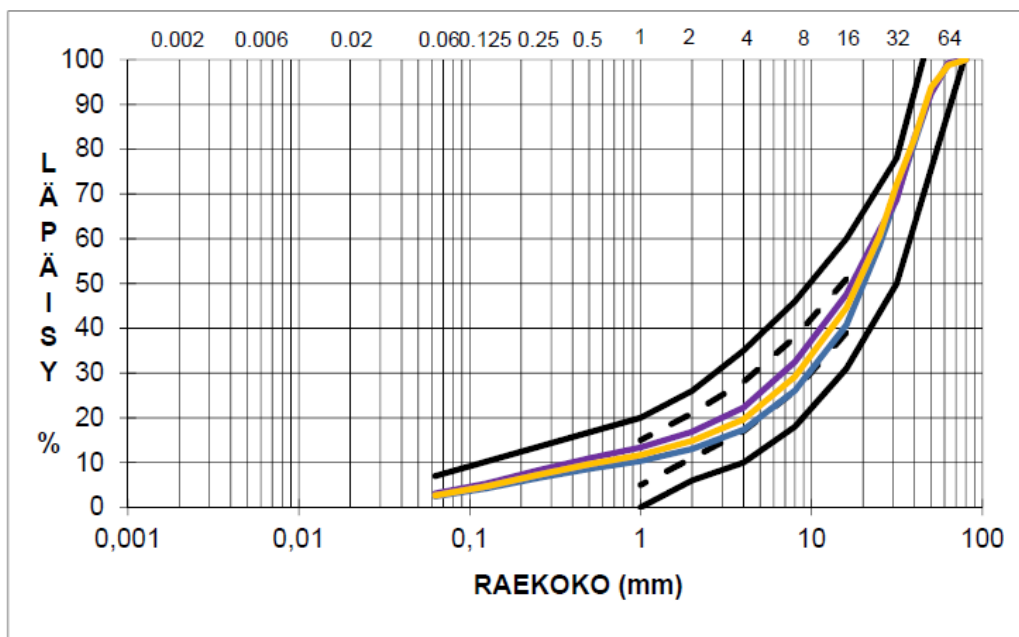
Kuvasta 9 nähdään että, vaahtolasimurske varastoidaan kasalle samaan tapaan kuin kalliomurske. Suurimpana erona vaahtolasimurskeen ja kalliomurskeen varastoinnin välillä on, että vaahtolasimurskeen kasaamisessa ei tarvitse juurikaan ottaa huomioon sen lajitumista. Tämä johtuu siitä, että vaahtolasimurskeen hienoainespitoisuus on hyvin pieni. Kuvassa 10 on Tampereen raitiotietyömaalla käytettävän Foamit 60 -vaahtolasimurskeen rakeisuuskäyrä.



Kuva 10. Foamit 60 -vaahtolasimurskeen raekokojakauma (Forsman et al. 2012).

Kuten kuvan 10 Foamit 60 -vaahtolasimurskeen raekokojakaumasta nähdään, hienoaikneksen (alle 0,063 mm aines) määrä on hyvin pieni (Forsman et al. 2012). Käytännössä tämä tarkoittaa, että vaahtolasimurskeen lajittuminen on hyvin vähäistä ja se voidaan kasata jyrkkäreunaiselle kasalle. Vastaavan rakeisuuden omaavan kalliomurskeen tapauksessa varastointi samankaltaiselle jyrkkäreunaiselle kasalle saattaa johtaa materiaalin lajittumiseen.

Kuvassa 11 on rakeisuudeltaan Foamit 60 -vaahtolasimursketta vastaavan kalliomurskeen rakeisuuskäyriä määritettynä erään kiviainestoimittajan murskauspaikalta otetuista näytteistä (Kalliainen et al. 2017). Rakeisuuskäyristä huomataan, että näytteissä on huomattavasti enemmän hienoaainesta kuin raekooltaan vastaavassa vaahtolasimurskeessa.



Kuva 11. Erään kiviainestoimittajan murskauspaikalta otettujen näytteiden raekokoja-kaumat. Mustien yhtenäisten ja katkoviivojen ohjekäyrien sisäpuolella olevat värilliset viivat edustavat kolmea näytettä. (Kalliainen et al. 2017)

Lajittuminen johtuu lähinnä painovoimasta ja kasan reunojen muodosta. Kun kalliomurske kasataan jyrkkäreunaiseksi kasaksi, karkeampi tilavuuspainoltaan raskaampi aines pyrkii valumaan kasan reunoja pitkin alaspäin ja näin ollen pakkautuu kasan pohjalle. Kuormatessa tällaisesta kasasta etenkin kasan pohjalta ensimmäiset kauhalliset ovat raekokojakaumiltaan hyvin karkearakeisia, kun taas ylempänä kasassa oleva maa-aines on hienoaainespitoista.

Toinen lajittumiseen vaikuttava seikka on varastoinnin kesto. Mitä kauemmin kiviainesta varastoidaan, sitä pidempi aika sillä on olla säiden armoilla ja sitä enemmän se lajittuu. Kalliomursketta varastoidessa se kannattaakin vetää varastointipaikalle matoiksi kerroksittain niin, että kukin kerros vedetään toisiinsa nähden 90 ° kulmassa (Tielaitos 1999). Lisäksi tulee varmistua, että kasan reunat jäävät mahdollisimman loiviksi, jotta hienoaines ei valu kasan reunoja pitkin sen pohjalle.

5.4 Vaahtolasimurskeen kustannukset Tampereen raitiotiehankkeessa

Vaahtolasimurskeella on korvattu suodatinhiekkä routaeroja tasaavassa siirtymäkiilassa, koska hiekan lämmönjohtavuus on suurempi kuin vaahtolasin ja vaahtolasista rakennettava rakennekerros on siten ohuempi. Vaahtolasikiilojen poikkipinta-ala on Raitiotieallianssin suunnitelmien mukaan keskimäärin 2,7 m². Passin (2017) havainnekuvan ja Forsman et al. (2012) selvityksen perusteella vastaavalle suodatinhiekkasta tehtävän siirtymärakenteen poikkipinta-alan voidaan arvioida olevan noin 22 m². Suodatinhiekkakiilan

pinta-ala saadaan, kun vaahtolasikiilan paksuimman kohdan korkeus kerrotaan kolmella, jolloin tulos vastaa keskiarvoltaan suuntaa-antavasti sekä Passin (2017) havainnekuvaa että Forsman et al. (2012) selvitystä hiekan lämmönjohtavuudesta.

Näiden perusteella taulukkoon 9 on laskettu sadan metrin matkalta rakennusteoreettiset tilavuudet vaahtolasimurskeesta ja suodatinhiekkasta tehdyille siirtymärakenteille ja vastaavat vertailukustannukset. Vaahtolasimurskeen hinta toimitettuna Tampereelle Foamitin tarjouksen perusteella 44,50 €/m³. Vaahtolasimurskeella tulee kuitenkin ottaa huomioon sen murskautuvuus tiivistettäessä. Tiivistymisarvona laskelmissa on käytetty 1,25. Suodatinhiekan hintana käytettiin 9,44 €/m³rtr (Kuisma 2013). Esitetyt hinnat ovat ainoastaan rakennusteoreettisen rakenteen hintoja ilman kuljetuksia.

Taulukko 9. *Vaahtolasi- ja suodatinhiekkakiilan rakennusteoreettisten tilaavuuksien ja kustannusten vertailu Tampereen raitiotiehankkeessa 100 m kohden (Foamit 2017, Kuisma 2013)*

Materiaali	Tilavuus [m ³ rtr]	Hinta [€/m ³ rtr]	Kustannus [€]	Kustannus- ero [€]
Vaahtolasimurske Foamit 60A	270	44,50	15 018,75	-
Suodatinhiekk	1 620	9,44	15 294,80	+274,05

Tuloksista nähdään, että sadan metrin matkalla materiaalikustannusero ei ole mittava. Kuitenkin suodatinhiekan menekki on huomattavasti suurempi verrattuna vaahtolasimurskeeseen, joten hiekan kuljetuskustannukset ovat suuremmat kuin vaahtolasin. Kuljetusmatkojen kasvaessa suodatinhiekan hinta 100 metriä kohden kasvaa vaahtolasimurskeeseen verrattuna. Lisäksi paksummalla rakenteella maaleikkauksen määrä kasvaa, mikä lisää rakenteen hintaa. (Kuisma 2013) Suodatinrinkaan kustannuksista ei muodostu huomattavaa eroavaisuutta, sillä pienempi vaahtolasikiila koteloidaan kauttaaltaan suodatinrinkaaseen, kun taas suodatinhiekkalla tavallisesti riittää, että suodatinrinkas asennetaan vain sen alle. Vaikka vaahtolasimurskeen rakennettavuuden voidaan arvioida olevan samankaltaista kuin rakeisuudeltaan vastaavan kalliomurskeen, saattaa sen tiivistäminen tuottaa ongelmia vähäisen hienoainespitoisuuden takia. Tällaiset rakennusvaiheen ongelmat lisäävät vaahtolasimurskeen käytön kokonaiskustannuksia etenkin hankkeen alkuvaiheessa.

6. YHTEENVETO

Vaahtolasimurske osoittautui Tampereen raitiotien rakentamisessa hyväksi ratkaisuksi sillä saavutettujen kustannussäästöjen vuoksi. Raitiotien maarakentamisessa oli erityistä hyötyä vaahtolasimurskeen hyvästä lämmöneristävyyydestä. Vaahtolasisiirtymäkiilasta kiintoraidelaatan sivuilla saatiin huomattavasti pienempi rakenne kuin suodatinhiekkasta rakennetusta vastaavasta rakenteesta, mikä oli elintärkeää rakennettaessa tiiviissä kaupunkiympäristössä, missä tilaa on paikoin hyvin rajoitetusti.

Täysin ongelmaton materiaali vaahtolasimurske ei kuitenkaan käytössä ollut. Sen rakennettavuutta moitittiin muun muassa pölyämisen, ihoärsytyksen ja tiivistämisvaikeuksien vuoksi. Suunnitteluvaiheessa vaihtoehtomateriaalina vaahtolasimurskeelle ajatellun XPS-levyn kanssa vastaavia ongelmia ei olisi ollut, ja lisäksi materiaalivirratt ja kerrospaksuudet olisivat pienentyneet entisestään. Vaahtolasimurskeen valintaan vaikutti sen XPS-levyjä parempi saneerattavuus. Vaahtolasimurskeen arvioidaan olevan helpommin kaivettavissa auki kuin yhtenäinen XPS-levyrakenne, joka rikkoutuu kaivettaessa ja on vaihdettava uuteen tulevien kaivutöiden yhteydessä.

Vaahtolasimurske on Suomessa tuoteistettu ja sitä valmistaa tällä hetkellä vain Uusioaines Oy Forssassa. Tuoteistamisen takia vaahtolasimurske ei ole jäte, vaikka se lasijätteestä valmistetaankin. Näin ollen vaahtolasimurskeen käyttö ei vaadi ympäristölupaa tai MARA-asetuksen mukaista ilmoitusmenettelyä. Lisäksi tuoteistaminen on vaatinut vaahtolasimurskeen laajan testaamisen ja paljon tutkimuksia, joiden vuoksi sen ominaisuuksista on kattavasti tietoa. Näiden seikkojen vuoksi vaahtolasin käyttöönotto maarakentamisessa voidaan tehdä suhteellisen matalalla kynnyksellä.

LÄHTEET

Aho, S. & Saarenketo, T. (2006). Managing drainage on low volume roads Executive Summary. April 2006. Roadex III Project.

Byggforsk. (2005). CUAP Common Understanding of Assessment Procedure for an European Technical Approval according to Article 9.2 of the Construction Products Directive Factory made cellular glass loose fill. ETA request No 12.01/08. Final version 06.12.2005. The Norwegian Building Research Institute. Oslo. 15 s. + liit. 4 s.

Ehrola, E. (1996). Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet, Rakennustieto Oy, Helsinki.

Eriksson, L. & Hägglund, J. (2008). Handbok. Skumglas i mark- och vägbyggnad. Linköping. Statens geotekniska institut (SGI), Information 18:1. 26 s.

Forsman J., Hakari M., Sikiö J., Ronkainen M. & Sikiö J. (2012). Suunnittelu & rakennusohje: Foamit-vahtolasi, Ramboll Finland Oy.

Hagen, M. & Vaslestad, J. (2013). Case histories using foamglass for roads to reduce settlement and stability problems. Proceedings of the 9th BCRRA Conference, Trondheim, Norway, 25-27 June, 2013.

Kalliainen A., Kolisoja P., Matinlauri S. & Rossi J. (2016). Vaihtoehtoisia maarakennusmateriaaleja sisältävien tie- ja katurakenteiden vaurioituminen, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 52/2016, Liikennevirasto, Helsinki.

Kalliainen A., Kuula P. & Leppänen M. (2017). Väylärakenteiden valtakunnallinen kiiviaines- ja geosyntettitutkimus. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2017, Liikennevirasto, Helsinki.

Kuisma, S. (2013). Vahtolasimurskeen hyödyntäminen kevennysrakenteissa ja routaeristeenä kaupunkiympäristössä, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikka, Yhdyskuntatekniikka, Tampere.

Kärki I. (2019). Suullinen tiedonanto. Tampere.

Köylijärvi, E. (2014). Vahtolasimurskeen käyttö maa- ja pohjarakentamisessa, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 14/2014, Liikennevirasto, Helsinki.

Liikennevirasto. (2011). Kevennysrakenteiden suunnittelu, Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. 05/2011 Liikenneviraston ohjeita, Helsinki 2011, Liikennevirasto.

Misapor AG. (2018). [WWW]. [Viitattu 23.3.2018]. Saatavissa: www.misapor.com.

Passi, T. (2017). Tampereen raitiotie, TTY, Maarakennustekniikka-kurssin luento, Raitiotieallianssi, Tampere.

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tammirinne, M. (2009). Geotekniikka. 464 Otatieto. Helsinki: Hakapaino Oy.

Ritola J. & Vares S. (2008). Keräyslasin hyötykäyttö vaahtolasituotteina, VTT Tiedotteita 2458. 51 s. + liitt. 2 s., Espoo.

Tielaitos (1999). Murskaustyöt, Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset, Työselytykset ja laatuvaatimukset, Helsinki.

Uusioaines Oy Foamit [WWW]. [Viitattu 21.3.2020]. Saatavissa: <https://www.foamit.fi/>.